

ОБРОБКА МЕТАЛІВ ТИСКОМ

УДК 621.983.044

© Анищенко А.С.¹, Кухарь В.В.², Мкртчян Е.А.³**АППРОКСИМАЦИЯ ФОРМУЛАМИ ЛЯМЕ-ГЕЛИСА КОНТУРА
ОБОЛОЧЕК ПРИ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ФОРМОВКЕ
ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК**

Показано, что контур заготовки на всех стадиях сверхпластической формовки может быть описан универсальными формулами, известными как «суперформула» Гелиса и «суперэллипс» Ляме. Определены диапазоны значений коэффициентов, входящих в эти формулы. Проведена аппроксимация предложенными формулами контура оболочек, изготовленных сверхпластической формовкой различными авторами. Показано, что контуры оболочек могут иметь параболообразный и эллипсоидный вид.

Ключевые слова: сверхпластическая формовка, аппроксимация, контур, суперформула, суперэллипс.

Аніщенко О.С., Кухар В.В., Мкртчян Є.А. Апроксимація формулами Ляме-Геліса контуру оболонок при надпластичному формуванні листових заготовок. Показано, що контур заготовки на всіх стадіях надпластичного формування може бути описаний універсальними формулами, що відомі як «суперформула» Геліса або «супереліпс» Ляме. Визначені діапазони значень коефіцієнтів, які входять в ці формули. Проведена апроксимація наданими формулами контуру оболонок, що виготовлені надпластичним формуванням різними авторами. Показано, що контури оболонок можуть мати параболоподібний та еліпсоподібний вигляд.

Ключові слова: надпластичне формування, апроксимація, контур, стадія формування, суперформула, супереліпс.

O.S. Anishchenko, V.V. Kukhar, E.A. Mkrtchyan. Approximation by the Lamé-Gielis formula of the shell contours at superplastic forming of sheet blanks. The paper shows that the contour of a sheet blank at all stages of superplastic forming can be described using universal formulas known as a «superformula» Gielis and «superellipse» Lamé. The work provides information on the values range of the coefficients entering into these formulas. The paper shows the results of approximation by means of the proposed formulas of shell contours manufactured by superplastic forming by different methods. The application of the «superformula» to approximate the spherical shell contours in the first stage of molding has been tested. The graphs that show the ratio of the ordinates of the contours of the spherical shells and the hemisphere are given. It is shown that the contours of the shells from the AlMg5 and Pb-38%Sn alloys are rejected in the direction of the formation of parabolas. It was found that the deviations increase with decreasing the coefficient of high-speed hardening of the alloy of the shell. The contour of AMg6 alloy shells and blanks of variable thickness, with maximum in the central zone, is diverted from the hemisphere towards the ellipse. The first stage of forming in a non-uniform temperature field forms a contour of shells, similar to an ellipse. Forming shells with the ra-

¹ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», as4@yandex.ru

² д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», kvv.mariupol@mail.ru

³ канд. техн. наук, ст. преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», egorkabest@gmail.com

tio of the height (H) and the radius (R) as $H = 0,6R$ in the angular zones of the matrix forms intermediate contours of different shapes. This shape depends on the presence of lubricant between the shell and the bottom of the matrix.

Keywords: *superplastic forming, approximation, circuit, stage of forming, superformula, superellipse.*

Постановка проблеми. Сверхпластическая формовка (СПФ) металлических оболочек впервые была заимствована в 1964 году из технологии газового формования термопластов [1] и возникла благодаря открытию сверхпластичности в металлах и сплавах. Постоянное расширение номенклатуры материалов и деталей, изготавливаемых СПФ из листов, в том числе в сочетании с диффузионной сваркой [2], обуславливает необходимость в совершенствовании существующих и разработке новых методов расчета этих процессов.

Анализ последних исследований и публикаций. Расчеты процессов сверхпластической формовки полых деталей из листов базируются, как правило, на теории тонкостенных безмоментных оболочек и используют уравнение Лапласа [1, 2]:

$$\frac{\sigma_1}{R_1} + \frac{\sigma_2}{R_2} = \frac{p}{S}, \quad (1)$$

где σ_1, σ_2 – меридиональное и тангенциальное напряжение в оболочке при формовке;
 R_1, R_2 – радиусы кривизны оболочки в меридиональном и тангенциальном направлении;
 p – давление деформирующей среды;
 S – толщина листовой заготовки.

В качестве уравнения связи используется уравнение установившейся стадии ползучести:

$$\sigma = k\xi^t, \quad (2)$$

где σ – интенсивность напряжений течения;
 ξ – интенсивность скоростей деформации;
 t – коэффициент скоростного упрочнения (чувствительности напряжения течения к скорости деформации);
 k – коэффициент, зависящий от свойств материала.

При расчетах СПФ рассматриваются как минимум две стадии формовки [2, 3]: 1) свободное выпучивание исходной заготовки в полость матрицы до контакта с ее дном; 2) оформление деформируемым металлом угловых зон стаканов или коробок. Иногда в отдельную третью стадию выделяют формообразование трехгранных углов коробок или оформление рельефа ребер жесткости на поверхностях деталей.

Необходимость в постадийном расчете процесса СПФ вызвана, помимо всего прочего, существенными изменениями геометрической формы контура деформируемой заготовки при переходе от свободной формовки к затеканию в угловые зоны сопряжения вначале донной и боковой поверхностей стаканов и коробок, а затем в трехгранные углы коробок или полости ребер жесткости. Кроме того, изменяются контактные условия трения на границе заготовка-штамп.

Немонотонная эволюция контура листовой заготовки при СПФ вызывает резкие изменения значений радиусов кривизны R_1 и R_2 , что усложняет расчеты по формуле Лапласа (1).

Радиусы кривизны R_1 и R_2 обычно определяют аппроксимацией экспериментальных данных различными формулами, предполагая, что контур формируемой заготовки является частью окружности, параболы, эллипса, цепной линии [1-8]. При расчетах технологии СПФ переход от одной стадии к другой зачастую связан с изменением системы координат, исходных допущений, граничных условий и отсутствием взаимозависимостей коэффициентов, входящих в формулу (2). Это усложняет расчеты и снижает их точность.

Целью настоящей работы является определение возможности аппроксимации контура деформируемой заготовки единой универсальной формулой на всех стадиях СПФ.

Изложение основного материала. Ряд исследователей считает, что форма контура заготовки при СПФ зависит от коэффициента скоростного упрочнения t : чем выше t , тем ближе контур заготовки к форме окружности. Низкий уровень сверхпластичных свойств металла заготовки, то есть малые значения t , обуславливает вырождение контура из окружности в параболический и даже гиперболический [4, 9]. Однако, на наш взгляд, прогнозирование формы заго-

товки при СПФ по величині коефіцієнта t некоректно.

Величину t визначають применительно ко всьому испытываемому образцу. В случаях СПФ заготовок с измененной структурой отдельных участков, а также формовки заготовки в неравномерном температурном поле целенаправленно добиваются снижения оптимальных структурных и температурных параметров сверхпластичности деформируемого металла в заданных участках. Если определить коэффициент t для этих условий деформирования, он будет значительно меньше оптимального значения, по которому предлагают оценивать геометрическую форму деформируемой заготовки. Вследствие этого контур купола, изготовленного из листовой заготовки формовкой при температуре, понижающейся от оптимальной в направлении полюса купола [10-11], отличается от сферообразного. А по данным работы [12], контур титановой трубы с огрубленной структурой в центральной части при сверхпластической раздаче более близок к контуру сифона, нежели к окружности или параболе.

СПФ заготовок переменной толщины при одинаковом коэффициенте t для всех участков заготовки может обеспечить сферо-, параболо- и эллипсоидообразную форму купола. Это зависит от местонахождения участков с максимальной и минимальной толщиной на поверхности заготовки и разности этих толщин относительно усредненной толщины заготовки.

Анализ коэффициента t , проведенный в работе [13], показывает, что его численные значения не являются константой и зависят от многих факторов, вследствие чего он не может служить объективным критерием для оценки параметров СПФ.

По нашему мнению, более обоснованы утверждения авторов [2, 14, 15] о том, что форма контура деформируемой заготовки зависит от распределения ее относительной толщины. Это можно объяснить следующими причинами:

1) экспериментально установлено [2, 3, 14], что при свободной СПФ максимальное отклонение формы купола от сферообразной наблюдается при наименьших значениях S/S_0 в полюсе купола (S , S_0 – текущая и начальная толщина заготовки);

2) перед разрывом стенки купола одновременно с резким уменьшением толщины заготовки в зоне разрыва происходит местное выпучивание контура с аномальным снижением радиусов кривизны; это явление присуще как сверхпластической, так и обычной холодной формовке деталей;

3) регулирование утонения заготовки (как правило, снижение разнотолщинности её стенок) методами СПФ заготовок переменной толщины [16], предварительной подготовкой различной структуры на заданных участках [10], в неравномерном температурном поле [10, 11] сопровождается заметным отклонением купола на стадии свободной формовки от формы сферообразного сегмента.

Таким образом, при выборе универсальной формулы для описания контура оболочек, формируемых в состоянии сверхпластичности, следует учитывать, что её графики при варьируемых значениях входящих в формулу параметров должны описывать различные формы парабол, окружностей, эллипсов и прямоугольников со скругленными углами.

На наш взгляд, такими формулами могут быть кривая Габриэля Ляме, чаще называемая «суперэллипсом» [17], и уравнение Йохана Гелиса [18], получившее название «суперформула».

В общем виде «суперэллипс» описывается в декартовых координатах формулой:

$$(x/a)^n + (y/b)^m = 1, \quad (3)$$

где n и m – показатели степени;

a и b – коэффициенты, $a > 0$, $b > 0$.

В зависимости от величин n , m , a и b графики формулы (3) описывают весь набор, контуров, которые имеют листовые заготовки на различных стадиях СПФ.

Йоханом Гелисом в работе [18] предложена более обобщенная формула, известная сейчас как «суперформула», которую можно использовать для описания многих сложных форм, встречающихся в природе. В полярных координатах для радиус-вектора r и угла φ «суперформула» имеет вид:

$$r = \sqrt[n_1]{\left[\left(\frac{1}{a} \cos\left(\frac{k\varphi}{4}\right)\right)\right]^{n_2}} + \left[\left(\frac{1}{b} \sin\left(\frac{k\varphi}{4}\right)\right)\right]^{n_3}} \quad (4)$$

где n_1 , n_2 , n_3 – параметры, определяющие форму кривой;

a, b – габариты (величины полуосей);

k – коэффициент, характеризующий число повторяющихся фрагментов.

Рассмотрим графики суперформулы (4), параметры n и m которой изменяются в пределах $1 \dots 24$ (рис. 1). Ее частным случаем ($n_1 = n_2 = n_3 = k = 4$) является наиболее известный суперэллипс Ляме (1), где $n = m = 4$, который представляет собой прямоугольник с закругленными углами. Поскольку искомые величины при СПФ оболочек принято изучать в безразмерных параметрах (относительно, к примеру, наибольших по величине начальной толщины S_0 заготовки и радиуса основания оболочки R , конечной высоты H оболочки и т. д.), нас будут, в первую очередь, интересовать участки графиков в интервалах $0 \leq x \leq 1$ и $0 \leq y \leq 1$. Для этого в уравнении (4) примем $a = b = 1$. Графики, расположенные в первом квадранте координатной плоскости, могут быть отражены в остальных квадрантах симметрично относительно координатных осей.

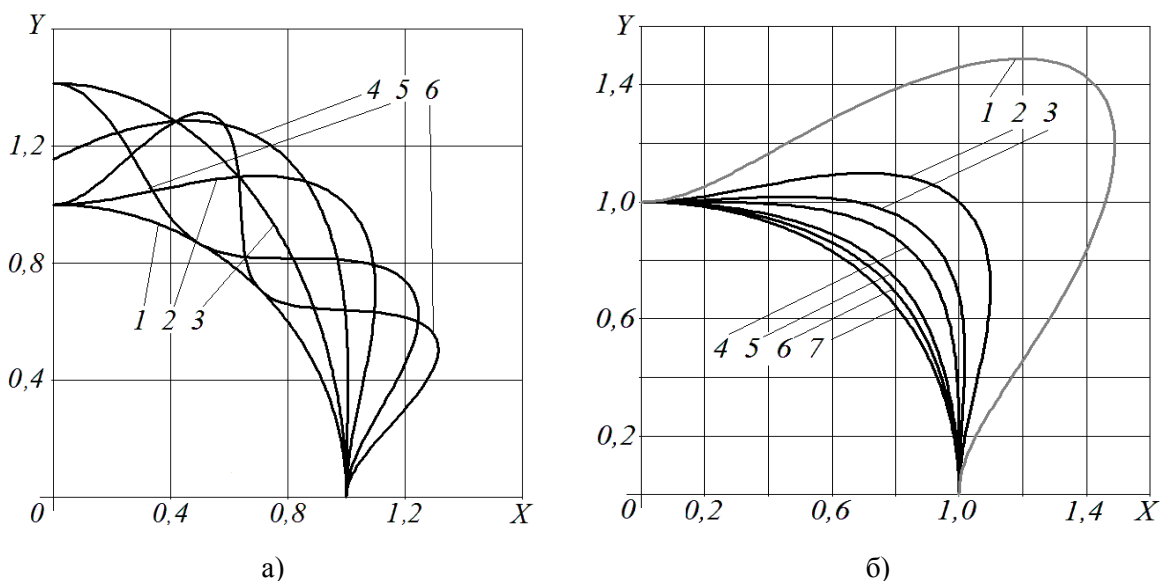


Рис. 1 – Графики суперформулы при $a = b = 1$ и различных значениях параметров n_1, n_2, n_3, k : а) – 1 – $k = 4, n_1 = n_2 = n_3 = 2$; 2 – $k = 4, n_1 = n_2 = 4, n_3 = 2$; 3 – $k = 2, n_1 = n_2 = 4, n_3 = 2$; 4 – $k = 3, n_1 = n_2 = 4, n_3 = 2$; 5 – $k = 6, n_1 = n_2 = 4, n_3 = 2$; 6 – $k = 8, n_1 = n_2 = 4, n_3 = 2$; б) – $k = n_1 = n_2 = 4$: 1 – $n_3 = 1$; 2 – $n_3 = 2$; 3 – $n_3 = 3$; 4 – $n_3 = 4$; 5 – $n_3 = 8$; 6 – $n_3 = 12$; 7 – $n_3 = 24$

Рис. 1, а показывает, какие дополнительные возможности в сравнении с суперэллипсом Ляме выявляются в суперформуле Гелиса за счет ввода множителя $k/4$. Лишь кривая 1, параметры $n_1 \dots n_3$ которой характеризуют её как окружность, при $k/4 = 1$ ($k = 4$) вписывается в область координат, ограниченную пределами $0 \leq x \leq 1$ и $0 \leq y \leq 1$. В остальных случаях графики суперформулы выходят за указанные выше пределы и показывают свою периодичность, характерную для тригонометрических формул, входящих в суперформулу. С учетом симметрии графиков относительно координатных осей количество периодов графиков в первом квадранте декартовых координат определяется величиной $k/4$. При $k/4 = 2$ ($k = 8$) таких периодов будет два (кривая 6), при $k/4 = 1,5$ ($k = 6$) – полтора периода (кривая 5) и т. д.

Таким образом, ввод в суперформулу (4) параметра $k/4$ позволяет преодолеть главное неудобство суперэллипсов – их ограничения в отношении симметрии. При наличии параметра k плоскость может быть разделена на множество секторов, число которых равно k , вместо четырех квадрантов в евклидовой плоскости. К примеру, при $k = 3, 4, 5 \dots$ кривая, описываемая в четырех квадрантах уравнением (4), будет иметь 3, 4, 5... повторяющихся фрагментов.

Чем выше уровень симметрии рассматриваемых контуров, тем более простой вид приобретает суперформула (4) за счет того, что параметры $n_1 \dots n_3$, а в ряде случаев и величины полуосей a и b , становятся равны друг другу. С учетом этого применительно к цели настоящей работы в суперформуле следовало бы использовать множитель $k/4 = 1$ ($k = 4$).

На рис. 1, б представлена эволюция графиков суперформулы при варьировании значений

параметра n_3 . Существенное изменение кривизны графиков 1-3 и их удаление от начала координат при $n_3 < 4$ обуславливает их непригодность для аппроксимации контуров оболочек при СПФ. Если $n_3 \geq 4$, то форма графиков изменяется на качественном уровне так же, как при аналогичном изменении n и m в суперэллипсе Ляме при условии, что $n = m$.

Таким образом, если необходима аппроксимация наиболее распространенных основных контуров при СПФ оболочек, которые характеризуются наличием одной или нескольких плоскостей симметрии (сферы, цилиндрические стаканы, коробки), то приемлемы обе формулы (3) и (4), причем аппроксимация суперэллипсом Ляме более проста, так как требует определения численных значений лишь двух коэффициентов n и m . Более сложные контуры оболочек (коробки с ребрами жесткости, цилиндрические стаканы с поднутрениями, оживала с поверхностями различных радиусов кривизны и т.п.) следует аппроксимировать суперформулой Гелиса.

Рассмотрим возможности описания основных контуров оболочек с помощью суперэллипсов Ляме (рис. 2). Анализ графиков показывает, что формулы (3), в которых $n \leq 1$, при всех значениях m из интервала 0,25-8 непригодны для аппроксимации. Даже при $m = 4$ и 8 графики (рис. 2, а) в точке с координатами $x = 0, y = 1$ имеют угол наклона к оси x , отличный от нуля, что невозможно как в случае формирования куполов, так и для СПФ коробок и стаканов. Кривые формулы (3) (см. рис. 2, б) при $n = 2$ и $m \geq 1$ могут быть в принципе использованы для аппроксимации как параболообразных, так и эллипсоидных контуров оболочек на первой стадии СПФ, а также для описания формируемых контуров стаканов и коробок на второй стадии СПФ.

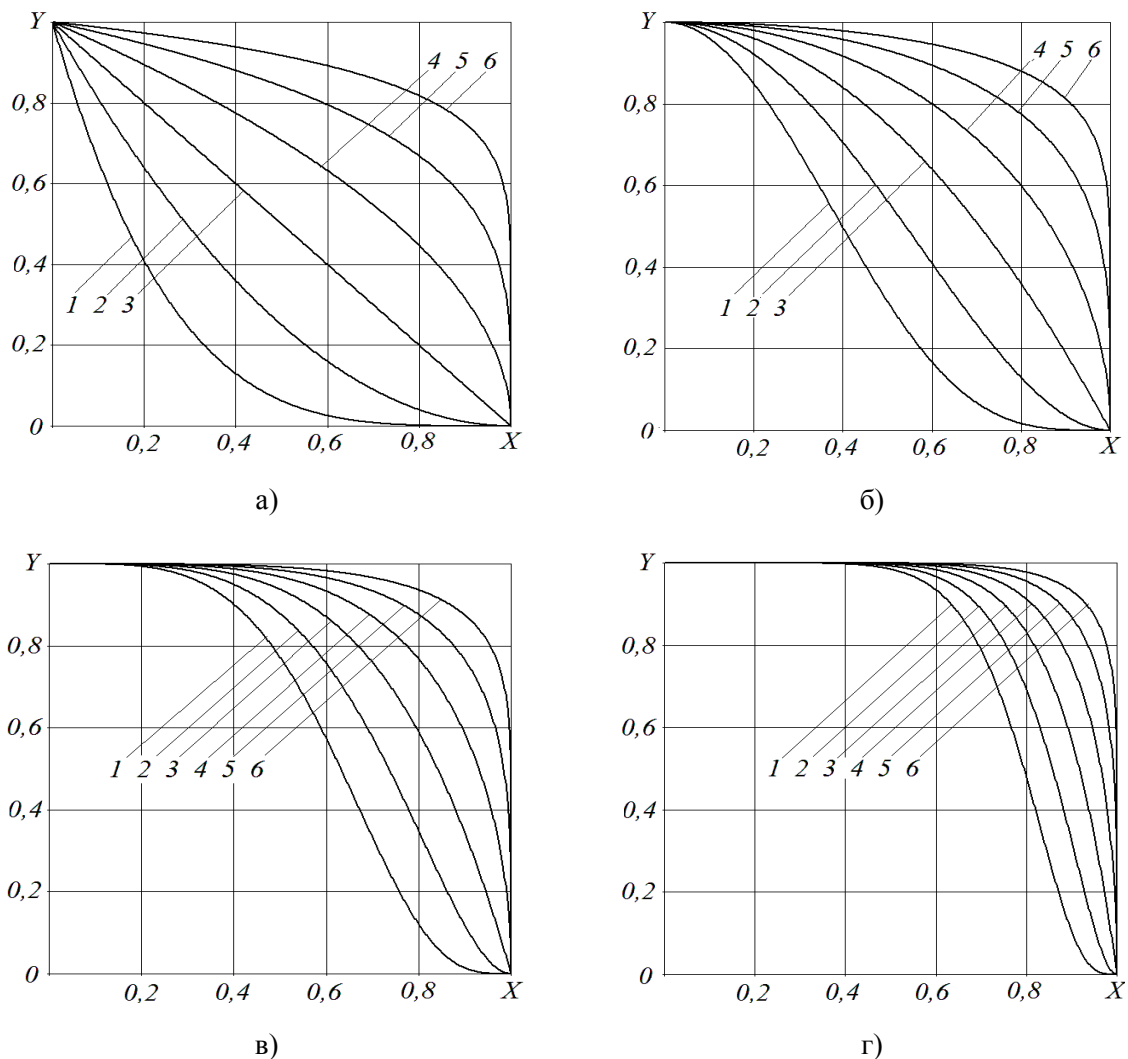


Рис. 2 – Графики суперэллипсов при $a = b = 1$ и различных значениях параметров n и m : а) – $n = 1$; б) $n = 2$; в) $n = 4$; г) $n = 8$; 1 – $m = 0,25$; 2 – $m = 0,5$; 3 – $m = 1$; 4 – $m = 2$; 5 – $m = 4$; 6 – $m = 8$

Графики суперэллипсов на рис. 2, в при $n = 4$ можно использовать для аппроксимации нескольких вариантов контуров оболочек. При значениях $m \geq 1$ графики 3-6 моделируют контур оболочек, полюс которых достиг дна матрицы и началась вторая стадия СПФ. При $n = m = 4$ оформление угловых зон происходит при равномерной деформации полюсных и фланцевых зон оболочки, при $m = 1, 2$ – с преобладанием утонения полюсных зон, при $m = 8$ – при торможении деформации оболочки в полюсных зонах силами трения о матрицу и оформлении угловых зон оболочки преимущественно за счет утонения прифланцевых участков заготовки. Кривые 1 и 2 ($m = 0,25$ и $0,5$) в точке с координатами $x = 1, y = 0$ имеют перегиб, что позволяет использовать их для аппроксимации контуров оболочек с учетом радиуса скругления матрицы.

Рис. 2, г показывает, что суперэллипсом при $n = 8$ можно моделировать контур оболочек, оформляющих угловые зоны преимущественно за счет деформации центральных участков оболочки. При $n = m = 8$ деформация полюсных и прифланцевых зон оболочки примерно одинаковая, а радиус скругления угловой зоны существенно меньше, чем у кривой с $n = m = 4$. Графики 1, 2 ($m = 0,25$ и $0,5$) также, как и на рис. 2, в, имеют перегиб в точке с координатами $x = 1, y = 0$, но с меньшим радиусом, поэтому могут отображать контур оболочек как с учетом, так и без учета радиуса скругления матрицы.

Достоинством рассматриваемой формулы является возможность по величине вышеназванных коэффициентов определять контур изготавливаемой детали и, следовательно, стадию СПФ, описываемую суперформулой, а также наличие сверхпластичных свойств деформируемого металла. У математиков для этих целей введен параметр прямоугольности $\eta = 2/n(n = m)$. Чем ближе значения η к единице, тем ближе контур деформируемой заготовки к окружности на стадии свободной выдувки, то есть тем выше уровень сверхпластичных свойств деформируемого металла.

Значения $2 > \eta > 1$ свидетельствуют о невысоком уровне сверхпластичности металла заготовки и вырождении её сферообразного контура (в первых двух квадрантах секущей плоскости, т.е. при положительных ординатах) в параболообразный и далее вплоть до конического (при $\eta = 2$ и $n = m = 1$), который может иметь место при заполнении ребер жесткости с треугольным контуром в сечении. График суперформулы во всех четырех квадрантах в этом случае имеет вид ромба, прямоугольника или квадрата с вершинами на осях координат.

При $4 > \eta > 2$ ($n < 1$ и $m < 1$) суперформула постепенно превращается в астроида ($\eta = 4$). Значения n и m , меньшие единицы, свидетельствуют об ошибках при аппроксимации суперформулой.

Интервал значений $2 < (n, m) < 4$ или $1 > \eta > 0,5$ позволяет предположить, что процесс СПФ осуществляется с торможением деформации центральных зон заготовки. Контур заготовки из сферического преобразуется в эллиптический. При $n = m = 4$ (вариант суперформулы – «суперэллипс», досконально изученный Ляме) контур кривой имеет вид прямоугольника с достаточно большим радиусом сопряжения сторон в углах. Можно утверждать, что суперформула в таком виде описывает вторую стадию СПФ – заполнение угловых зон цилиндрических или коробчатых деталей. Для деталей типа стаканов и коробок приемлемый радиус сопряжения сторон в углах, равный двум-четырем толщинам заготовки, достигается при $(n \text{ и } m) = 7 \dots 10$.

Кроме этого, если $n > m > 4$, то на второй стадии СПФ имеет место деформация центральных зон купола, которая превышает деформацию прифланцевых участков заготовки. Такое может происходить, если между дном матрицы и центральными зонами купола имеется эффективная смазка с низким коэффициентом трения. Форма деформируемого полуфабриката характеризуется наличием плоской полюсной поверхности, переходящей в парабола- или гиперболообразную поверхность периферийных участков, не контактирующих с боковой поверхностью матрицы.

Вариант суперформулы с $m > n > 4$ допустим, если заготовку перед СПФ подвергали вытяжкой жестким пуансоном (пневмомеханическая формовка). График суперформулы имеет прямой вертикальный участок вблизи фланца, переходящий в эллиптическую кривую, заканчивающуюся в полюсе купола.

Рассмотрим геометрическую форму оболочек с $H = R$ (на первой стадии) и $H = 0,6R$ (на двух стадиях СПФ) и особенности её аппроксимации формулой Ляме, используя экспериментальные данные работ [3, 5, 16]. Как указано выше, выбор формулы обусловлен наличием большого числа осей и плоскостей симметрии круглых в плане оболочек, вследствие чего ис-

пользование более сложной формулы Гелиса нецелесообразно.

Для аппроксимации контуров с $H = R$ были выбраны оболочки из сплавов $AlMg5$ [3], $Sn-38\%Pb$ с различными значениями коэффициента t [5] и сплава АМг6 [16]. Заготовки из сплава АМг6 имели переменную толщину: $S_0 = 1,45$ мм в центральной части диаметром 60 мм; $S_0 = 1,23$ мм на кольцевом периферийном участке с диаметрами, равными 100 и 60 мм.

Для аппроксимации контуров с $H = 0,6R$ были выбраны оболочки из сплава $AlMg3$ [3] в форме: а) сфероподобных сегментов, отформованных на первой стадии СПФ в изотермических условиях и в неравномерном температурном поле; б) промежуточных полуфабрикатов стакана, формируемых на второй стадии СПФ в цилиндрическую матрицу.

В таблице приведены формулы Ляме, аппроксимирующие контуры оболочек с $H = R$ и с $H = 0,6R$.

Таблица

Формулы аппроксимации реальных контуров оболочек при СПФ

Для оболочек с $H = R$		Для оболочек с $H = 0,6R$	
Параметры оболочки	Аппроксимирующая формула в безразмерном виде	Параметры оболочки	Аппроксимирующая формула в безразмерном виде
Сплав АМг6, заготовка переменной толщины	$Y_{3IT} = (1 - X_R^{2,58})^{1/1,96}$	СПФ сегмента в неравномерном температурном поле	$Y_{TP} = 0,6[1 - (X_{TP})^{2,36}]^{1/1,23}$
Сплав $Sn-38\%Pb$, $t = 0,60$	$Y_{t0,6} = (1 - X_R^{2,02})^{1/1,92}$	Формовка со смазкой стакана	$Y_L = 0,6[1 - (X_L)^{3,03}]^{1/1,32}$
Сплав $Sn-38\%Pb$, $t = 0,25$	$Y_{t0,25} = (1 - X_R^{1,98})^{1/1,72}$	Формовка стакана без смазки	$Y_{NL} = 0,6[1 - (X_{NL})^{2,58}]^{1/1,64}$
Сплав $AlMg5$	$Y_{AlMg5} = (1 - X_R^{1,99})^{1/1,78}$	СПФ сегмента в изотермических условиях	$Y_{SG} = 0,6[1 - (X_{SG})^{1,94}]^{1/1,28}$

На рис. 3 и 4 представлены относительные отклонения q реальных контуров оболочек с $H = R$ и $H = 0,6R$ от контуров полусфер Y_0 и сферических сегментов Y_{SG} . Относительное отклонение определяли как $q = Y_i / Y_j$, где Y_i – аппроксимирующие функции реальных контуров оболочек (см. табл.); Y_j – формулы окружности Y_0 и сферического сегмента Y_{SG} [19]:

$$Y_{SG} = \frac{(1 + \beta^2)}{2\beta} \left\{ 1 - \left[\frac{2\beta X_{SG}}{(1 + \beta^2)} \right]^2 \right\}^{1/2} - \frac{1 - \beta^2}{2\beta}, \quad Y_0 = (1 - X_0^2)^{1/2},$$

где $X_0 = x/R$, $Y_0 = y/R$ – безразмерные координаты точек контура окружности, изменяющиеся в интервале $0 \leq (x; y) \leq 1$;

x и y – текущие значения радиуса основания и высоты оболочки.

Все формулы не учитывают наличие радиуса сопряжения деформируемой оболочки и фланца, т. е. недостоверны в интервале $x = (0,95 \dots 1,00)R$.

Кривые 2-4 на рис. 3 подтверждают данные ряда авторов [3-5, 9] о том, что контур оболочек, свободно формируемых в полость матрицы, определяется уровнем сверхпластичных свойств их материала. Чем он ниже (меньше величина коэффициента t , больше разнотолщинность оболочки), тем в большей степени контур оболочек отклоняется от сферического в сторону параболы. При этом в аппроксимируемых формулах $m < n < 2$. Однако если применить для СПФ заготовку переменной толщины, то вызванное этим изменение напряженного состояния обусловит контур оболочек на первой стадии СПФ, смещенный в ее центральных зонах в сторону эллипса (кривая 1, рис. 3). Аппроксимирующая функция Y_{3IT} при этом характеризуется

параметром $n > 2$, тогда как $m < 2$, что, вероятно, является следствием низкого уровня сверхпластичных свойств сплава АМг6.

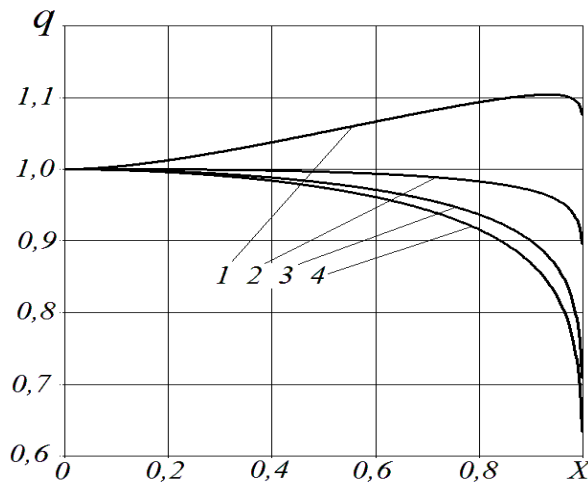


Рис. 3 – Распределение соотношения ординат реальных контуров оболочек с $H = R$ и полушеры вдоль их радиуса основания:

1 – $q = Y_{3ПТ} / Y_0$; 2 – $q = Y_{t0,6} / Y_0$;

3 – $q = Y_{AlMg5} / Y_0$; 4 – $q = Y_{t0,25} / Y_0$

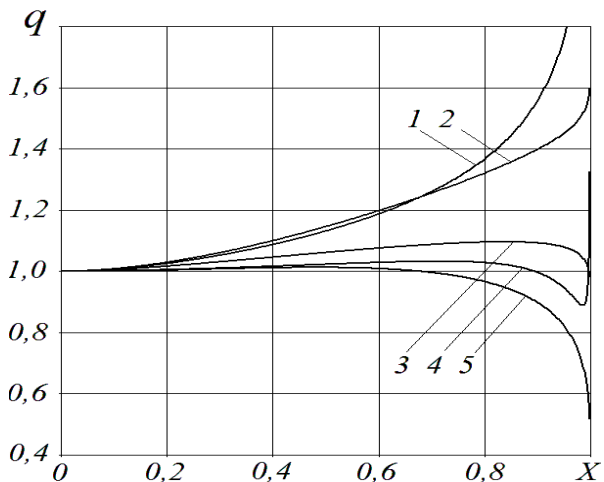


Рис. 4 – Распределение соотношения ординат контуров оболочек с $H = 0,6R$ из сплава АМг3 вдоль их радиуса основания:

1 – $q = Y_{NL} / Y_{SG}$; 2 – $q = Y_L / Y_{SG}$;

3 – $q = Y_{TP} / Y_{SG}$; 4 – $q = Y_0 / Y_{SG}$; 5 – $q = Y_L / Y_{NL}$

Как показывают графики на рис. 4, параболаобразная форма оболочки имеет место и при её меньшей высоте $H = 0,6R$ (кривая 4). Отклонение q здесь не превышает 0,03 в достоверном интервале изменений, тогда как для оболочек с $H = R$ параметр q находится в пределах 0,04...0,18.

Подстуживание заготовки малыми каплями воды, стекающими с интервалом в 20 секунд с ходографа на полюсные зоны, обеспечивало неравномерное температурное поле по контуру оболочки при её формовке на первой стадии СПФ. В результате торможения утонения центральных зон оболочки её контур в зонах полюса отклонялся от сферического в сторону эллипса, как и в случае применения заготовки переменной толщины (см. кривая 3, рис. 4). Максимум отношения ординат аппроксимирующих функций Y_{TP} и Y_{SG} составил $q_{max} = 1,1$ при $X = 0,84$.

Из-за захлаживания центральной поверхности деформируемой заготовки не удалось сформировать высокие купола. Разрыв стенок куполов фиксировался не в полюсе, а на участках поверхности между полюсом и фланцем. При этом толщина стенок в полюсных зонах была примерно равной толщине стенок на участках, где происходило разрушение металла.

Вторая стадия СПФ при формовке цилиндрического стакана с $H = 0,6R$ формирует контур промежуточного полуфабриката, существенно зависящий от наличия смазки на донной поверхности матрицы, изменяющей характер течения металла при заполнении углов стаканов. При формовке без смазки участки оболочки, находящиеся в контакте с дном матрицы, практически не деформируются, и оформление контуров стакана происходит за счет утонения свободных зон оболочки. Наличие смазки на границе оболочка-дно матрицы вызывает дальнейшее утонение полюсных зон оболочки на второй стадии СПФ [3]. У контура полуфабриката появляется прямой участок, берущий свое начало в полюсе купола и переходящий в параболаобразную кривую, переходящую по радиусу сопряжения матрицы во фланец заготовки. Прямой участок контура с течением времени увеличивается (возрастает радиус кривизны оболочки), тогда как в зоне фланца такой же прямой участок контура возникает позднее. Ординаты оболочки в этих зонах возрастают в направлении дна матрицы более интенсивно, чем при формовке без смазки (кривые 1 и 2, рис. 4). Вместе с этим деформация прифланцевых участков оболочек более интенсивна при формовке без смазки. Кривая 5 (рис. 4) показывает, что в интервале значений $0 < x/R < 0,68$ ординаты полуфабриката стакана выше при СПФ со смазкой, тогда как в прифланцевых зонах фиксируется обратная картина.

Выводы

Контур листовой заготовки на всех стадиях сверхпластической формовки может быть описан универсальными кривыми, известными как «суперформула» или «суперэллипс». Значения коэффициентов, входящих в эти формулы, позволяют на качественном уровне описать сверхпластические свойства металла заготовки, форму изготавливаемой оболочки, стадию сверхпластической формовки и наличие дополнительных операций регулирования течения деформируемого металла.

Геометрический контур оболочек на первой стадии СПФ может отличаться от сферообразного в сторону параболы или эллипса. Наличие смазки между матрицей и оболочкой способствует на второй стадии СПФ увеличению радиуса кривизны оболочки на этих участках.

Список использованных источников:

1. Giuliano G. Superplastic forming of advanced metallic materials / G. Giuliano. – Oxford : Woodhead Publishing Limited, 2011. – 377 p.
2. Специальные технологические процессы и оборудование обработки давлением / В.А. Голеньков [и др.]. – М. : Машиностроение, 2004. – 474 с.
3. Анищенко А.С. Изотермическая и сверхпластическая деформация металлов / А.С. Анищенко. – Saarbrücken : LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 129 с.
4. Holt D.L. The Relation Between Superplasticity and Grain Boundary Shear in the Aluminum – Zinc Eutectic Alloy / D.L. Holt // Trans. AWE. – 1968. – V. 242. – № 1. – P. 25-31.
5. Lechten J.-P. Analyses theorique et experimentale du gonflement dans le domaine de superplasticite / J.-P. Lechten, J.-C. Patrat, B. Baudalet // Revue de Physique Appliquee. – 1977. – № 12 (1). – P. 7-14.
6. Hwang Y.M. Evaluation of tubular materials by a hydraulic bulge test / Y.M. Hwang, Y.K. Lin, T. Altan // International Journal Machine Tools and Manufacturing. – 2007. – № 47. – P. 343-351.
7. Comparaison de trois modeles pour le post-traitment de mesures issues du test de gonflement libre de tubes / L. Vitu [et al.] // 22-ieme Congres Francais de Mecanique. – Lyon, 2015. – P. 67-78.
8. Куликов С.Н. Возможные варианты уточнения модели свободного термоформования изделий в круглой проеме / С.Н. Куликов // Научные труды МАТИ. – 2010. – № 17 (89). – С. 50-53.
9. Cornfield G.C. The forming of superplastic sheet metal / G.C. Cornfield, R.H. Johnson // International Journal of Mechanical Science. – 1970. – № 12. – P. 479-490.
10. Пневмоформовка листовых материалов в состоянии сверхпластичности / С.М. Поляк [и др.]. – М. : ЦНТИ «Поиск», 1981. – 107 с.
11. Смирнов О.М. Обработка металлов давлением в состоянии сверхпластичности / О.М. Смирнов. – М. : Машиностроение, 1979. – 184 с.
12. Деформирование титановых сплавов в условиях сверхпластичности / Б.В. Скуридин [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. – 1977. – № 12. – С. 35-38.
13. Рудской А.И. Механика динамической сверхпластичности алюминиевых сплавов / А.И. Рудской, Я.И. Рудаев. – СПб. : Наука, 2009. – 218 с.
14. Ragab A.R. Thermoforming of superplastic sheet in shaped dies / A.R. Ragab. – Metals Technology. – 1983. – V. 10, Issue 1. – P. 340-348.
15. Кухарь В.В. Кривая распределения температур при дифференцированном нагреве заготовок перед безручьевой гибкой-профилированием / В.В. Кухарь, А.И. Сердюк // Вісник НТУУ «КПІ». Серія : «Машинобудування». – 2016. – № 1 (76). – С. 65-72.
16. Способы уменьшения разнотолщинности при пневмоформовке полых деталей в режиме сверхпластичности / О.М. Смирнов [и др.] // Теория и технология обработки металлов давлением : Сб. науч. тр. / МИСиС. – М. : Металлургия, 1979. – № 113. – С. 70-75.
17. Sadowsky A.J. Exploration of novel geometric imperfection forms in buckling failures of thin – walled metal silos under eccentric discharge / A.J. Sadowsky, A.M. Rotter // International Journal of Solids and Structures, 2012. – V. 50. – P. 781-794.
18. Gielis J.A. Generic Geometric Transformation that unifies a Wide Range of Natural and Abstract Shapes / J.A. Gielis // American Journal of Botany. – 2003. – № 90 (3). – P. 333-338.
19. Анищенко А.С. Аппроксимация контура оболочек при сверхпластической формовке формулой Ляме / А.С. Анищенко, В.В. Кухарь, Е.А. Мкртчян // Вестник КРСУ. Серия : «Естественные и технические науки». – 2017. – Т. 17. – № 1. – С. 3-5.

References:

1. Giuliano G. Superplastic forming of advanced metallic materials. Oxford, Woodhead Publ. Limited, 2011. 377 p. (Eng.)
2. Golenkov V.A., Dmitriev A.M., Kukhar' V.D., Radchenko S.Iu. *Spetsialnye tehnologicheskie protsessy i oborudovanie obrabotki davleniem* [Special technological processes and equipment for pressure processing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 474 p. (Rus.)
3. Anishchenko A.S. *Izotermicheskaya i sverhplasticheskaya deformatsiya metallov* [Isothermal and superplastic deformation of metals]. Saarbrücken, LAMBERT Academic Publ., 2014. 129 p. (Rus.)
4. Holt D.L. The Relation Between Superplasticity and Grain Boundary Shear in the Aluminum – Zinc Eutectic Alloy. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, 1968, iss. 242, no. 1, pp. 25-31. (Eng.)
5. Lechten J.-P., Patrat J.-C., Baudalet B. Theoretical analyzes and experimental swelling in the area of superplasticity. *Revue de Physique Appliquee*, 1977, no. 12 (1), pp. 7-14. (Fr.)
6. Hwang Y.M., Lin Y.K., Altan T. Evaluation of tubular materials by a hydraulic bulge test. *International Journal Machine Tools and Manufacturing*, 2007, no. 47, pp. 343-351. (Eng.)
7. Vitu L. Comparison of three models for the post-treatment equipment measurements from the free tubes swelling test. *Abstracts of 22-th Congress of French Mecanique*, Lyon, 2015, pp. 67-78. (Eng.)
8. Kulikov S.N. Vozmozhnye varianty utochneniya modeli svobodnogo termoformovaniya izdeliy v krugloi proime [Possible options for clarifying the model of free thermoforming of products in a round armhole]. *Nauchnye trudy MATI – Scientific works of MATI*, 2010, no. 17 (89), pp. 50-53. (Rus.)
9. Cornfield G.C., Johnson R.H. The forming of superplastic sheet metal / G.C. Cornfield, R.H. Johnson. *International Journal of Mechanical Science*, 1970, no. 12, pp. 479-490. (Eng.)
10. Polyak S.M., Solomatin V.S., Tsepin M.A., Anishchenko A.S. *Pnevmoformovka listovykh materialov v sostoyanii sverhplastichnosti* [Pneumatic forming of sheet materials in superplasticity state]. Moscow, TsNTI «Poisk» Publ., 1981. 107 p. (Rus.)
11. Smirnov O.M. *Obrabotka metallov davleniem v sostoyanii sverhplastichnosti* [Processing of metals by pressure in the state of superplasticity]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 184 p. (Rus.)
12. Skuridin B.V., Smirnov O.M., Gusev Iu.V., Panfilova O.V. Deformirovaniye titanovykh splavov v usloviyakh sverhplastichnosti [Deformation of titanium alloys under superplasticity conditions]. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo – Forging and stamping production*, 1977, no. 12, pp. 35-38. (Rus.)
13. Rudskoy A.I., Rudaev Y.I. *Mekhanika dinamicheskoy sverhplastichnosti aluminievykh splavov* [Mechanics of dynamic superplasticity of aluminum alloys]. Saint Peterburg, Nauka Publ., 2009. 218 p. (Rus.)
14. Ragab A.R. Thermoforming of Superplastic Sheet in Shaped Dies. *Metal. Technologist*, 1983, iss. 10, pp. 340-348. (Eng.)
15. Kuhar V.V., Serdjuk A.I. Krivaja raspredeleniya temperatur pri differencirovannom nagreve zagotovok pered bezruch'evoy gibkoj-profilirovaniem [The temperature distribution curve for differentiated heating of the preforms before the bezel-free flexible profiling]. *Visnik NTUU «KPI». Seriya: mashinobuduvannya – Journal of Mechanical Engineering the National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»*, 2016, no. 1 (76), pp. 65-72. (Rus.)
16. Smirnov O.M., Guk V.O., Tsepin M.A., Anishchenko A.S. Sposoby umencheniya raznotolchinosti pri pnevmoformovke [Methods for reducing the variability of the thickness during the pneumoforming of hollow parts in the superplasticity regime]. *Teoriya i tekhnologiya obrabotki metallov davleniem: sb. nauch. tr. MISiS – Theory and technology of metal forming: col. of sci. works of MISA*, 1979, no. 113, pp. 70-75. (Rus.)
17. Sadowsky A.J., Rotter A.M. Exploration of novel geometric imperfection forms in buckling failures of thin-walled metal silos under eccentric discharge. *International Journal of Solids and Structures*, 2012, no. 50, pp. 781-794. (Eng.)
18. Gielis J.A. Generic Geometric Transformation that unifies a Wide Range of Natural and Abstract Shapes. *American Journal of Botany*, 2003, no. 90 (3), pp. 333-338. (Eng.)

19. Anishchenko A.S., Kuhar V.V., Mkrtchyan E.A. Approksimatsiya kontura obolochek pri sverhplasticheskoi formovke formuloi Lamé [Approximation of the shell contour for superplastic forming by the Lamé formula]. *Vestnik KRSU, seriya «Estestvennye i tehniccheskie nauki» – Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavonic University, series «Natural and Technical Sciences»*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 3-5. (Rus.)

Рецензент: С.С. Самотугин
д-р техн. наук, проф., ГБУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 12.04.2017